鄂尔多斯遗鸥自然保护区植物群落及土壤理化性质空间异质性

杨 悦[1,2], 李 龙[1,2], 曹治明[1,2], 张 亮[3], 张 鹏[4], 宋秀敏[5]
(1.内蒙古农业大学 旱区水工程生态环境全国重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2.内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 3.达拉特旗白泥井镇人民政府, 内蒙古 鄂尔多斯 014308; 4.辽源市自然资源局, 吉林 辽源 136299; 5.内蒙古鄂尔多斯市林业和草原局, 内蒙古 鄂尔多斯 017010)

摘 要: [目的]以鄂尔多斯遗鸥国家级自然保护区为研究对象,探究保护区土壤水分梯度变化对植被与土壤空间异质性的影响,揭示其空间变化趋势,为保护区植物多样性保护提供科学依据。[方法]采用机械取样方法,在保护区内垂直于湖岸边分别向南北两侧各布设3条样带,分析样带内距湖岸不同距离处植物群落及土壤理化性质空间分布特征。[结果]①随着距湖岸距离的增加,植物群落由盐生植物群落过渡到沙生植物群落,植物多样性指数呈现先增加后减小的变化趋势,并在100~150 m时植物多样性最高;芨芨草、油蒿群落的容重、含水率、电导率、孔隙度均随着距湖岸距离增加逐渐减小。②随着湖岸距离增加,含水率、电导率在不同土层中均降低且变化较大,含水率在0—10,10—20,20—30 cm分别减小了10.79%,10.09%,7.67%;电导率则分别减小了35.73,34.20,32.63 μS/cm。③相关性分析结果表明,植物多样性与含水率、电导率、全钾、黏粒显著相关,其中含水率与Simpson,Shannon-Wiener指数相关性最强且相关系数相等(-0.65)。驱动植物多样性的主要影响因子呈现明显的空间分异,在距湖岸0~50 m范围,植物多样性主要由土壤含水率、有机质和全钾共同影响;在50~150 m,电导率为主导因子;而在150~200 m,土壤含水率与电导率共同成为植物多样性分布的关键因子。[结论]受湖泊水域的影响,保护区形成明显土壤水分梯度变化,植被类型与土壤理化性质在该土壤水分梯度驱动下呈现出显著空间分异特征。

关键词: 植物群落; 土壤理化性质; 距湖岸距离; 土壤水分梯度; 鄂尔多斯遗鸥自然保护区
文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)03-0084-13 **中图分类号:** Q948.12

文献参数: 杨悦, 李龙, 曹治明, 等.鄂尔多斯遗鸥自然保护区植物群落及土壤理化性质空间异质性[J].水土保持通报,2026,46(3):84-96. Yang Yue, Li Long, Cao Zhiming, et al. Spatial heterogeneity of plant communities and soil physicochemical properties in Ordos *Larus relictus* Nature Reserve [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(3):84-96.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.03.030 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.03.030**

Spatial heterogeneity of plant communities and soil physicochemical properties in Ordos *Larus relictus* Nature Reserve

Yang Yue[1,2], Li Long[1,2], Cao Zhiming[1,2], Zhang Liang[3], Zhang Peng[4], Song Xiumin[5]
(1.*State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia* 010018, *China*; 2.*Desert Management College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia* 010018, *China*; 3.*Dalate Banner Bainijing Town People's Government, Ordos, Inner Mongolia* 014308, *China*; 4.*Liaoyuan Natural Resources Bureau, Liaoyuan, Jilin* 136299, *China*; 5.*Forestry and Grassland Bureau of Ordos City, Ordos, Inner Mongolia* 017010, *China*)

Abstract: [Objective] Taking Ordos *Larus relictus* National Nature Reserve as the research object, the effect of soil moisture gradient changes on the spatial heterogeneity of vegetation and soil properties in the reserve was

收稿日期:2025-08-09 **修回日期:**2025-12-10 **采用日期:**2025-12-12
资助项目:内蒙古自治区科技重大专项项目"内蒙古国土绿化空间结构调控及林草植被营建关键技术研究与示范"(2024JBGS0021); 鄂尔多斯市科技计划项目"鄂尔多斯遗鸥国家级自然保护区生物多样性与环境异质性响应研究"(YF20232347)
第一作者:杨悦(2000—),女(汉族),内蒙古自治区鄂尔多斯人,硕士研究生,研究方向为水土保持。Email:3345916413@qq.com。
通信作者:李龙(1989—),男(汉族),吉林省桦甸市人,博士研究生,副教授,主要从事土壤侵蚀及水土保持相关研究。Email:lilongdhr@126.com。

studied, and the spatial variation trends were analyzed in order to provide a scientific basis for the research and protection of plant diversity in the reserve. [Methods] A mechanical sampling method was used, and three transects were established perpendicular to the lakeshore on both the northern and southern sides of the reserve, and the spatial distribution characteristics of plant communities and their soil physicochemical properties at different distances from the shore of the lake were analyzed. [Results] ① With increasing distance from the lakeshore, the plant community shifted from the halophyte community to the psammophyte community, and the plant diversity index first increased and then decreased, reaching its maximum at 100—150 m. The bulk density, soil moisture content, electrical conductivity, and total porosity of *Achnatherum splendens* and *Artemisia ordosica* communities gradually decreased with increasing distance from the lakeshore. ② With increasing distance from the lakeshore, the soil moisture content and electrical conductivity decreased markedly across different soil layers. Soil moisture content decreased by 10.79%, 10.09% and 7.67% in 0—10, 10—20, and 20—30 cm, respectively. Electrical conductivity decreased by 35.73 μS/cm, 34.20, and 32.63 μS/cm respectively. ③ Correlation analysis showed that plant diversity was significantly correlated with soil moisture content, electrical conductivity, total potassium, and clay content. Among them, soil moisture content showed the strongest correlation with Simpson and Shannon-Wiener indices, and the correlation coefficients were equal, with a value of −0.65. The main driving factors of plant diversity showed obvious spatial differentiation: within 0—50 m from the lakeshore, plant diversity was mainly affected by soil moisture content, soil organic matter, and total potassium. At 50—150 m, electrical conductivity was the dominant factor. At 150—200 m, soil moisture content and electrical conductivity jointly became the key factors influencing the distribution of plant diversity. [Conclusion] Under the influence of the lake, the reserve exhibits a significant soil moisture gradient, and vegetation types and soil physicochemical properties show significant spatial differentiation characteristics driven by this gradient.

Keywords: plant community; soil physicochemical properties; distance from lakeshore; soil moisture gradient; Ordos *Larus relictus* Nature Reserve

湿地是由水陆相互作用形成的独特生态系统,在土壤浸泡在水中的特定环境下,生长着很多湿地的特征植物,植物群落结构和生态功能具有独特之处[1-2]。水文过程作为湿地的核心驱动力,调控着植被分布与土壤环境[3],进而影响整个生态系统在物质循环和能量流动过程[4]。植物作为湿地的初级生产者,植物的分布和物种多样性特征反映自然环境,是衡量湿地生态系统健康状况的指标[5]。与此同时,土壤理化性质不仅为植物生长提供基质与养分基础,也决定植物群落的结构和功能[6]。土壤养分不仅影响着植物生理结构,更是生态系统的结构和功能维持的关键决定因素[7]。植物多样性反映了群落的稳定程度和结构类型,探讨其与土壤因子之间的相关关系成为生态学领域研究的热点[8]。

在湿地环境中,水分的空间分布制约着周边的植物及土壤[9],直接影响到湿地植物组成和多样性[1]。而这种影响通过不同的植物群落传递至土壤,最终决定了土壤理化性质[10]。近年来,针对水分梯度明显的生境土壤空间分异的研究逐渐深入。冯雪琦等[11]在黄河孟津段沿河岸带设置400 m×400 m网格,每隔100 m设置样点,研究得出有机碳、土壤黏粒显著增加,垂直分布较为明显。武小钢等[12]在长治湿地公园将距离水陆交界区50 m内进行近水区、中水区、远水区划分,研究表明,近水区的土壤含水率高于远水区,土壤有机碳、全氮及盐含量随着距离增加逐渐增加。姜田亮等[13]在石羊河下游距离河岸每隔50 m设置样地,直至500 m,研究得出土壤有机碳随离河岸距离的增加而增加。在辉河湿地河岸带中研究显示,土壤理化性质随着离河岸距离增大和高程增加呈现明显的梯度变化,全氮、全磷和有机质从岸边到岸坡呈现先增大后下降的趋势[14]。在巴音布鲁克天鹅湖高寒湿地,土壤含水量、全碳、有机碳、全氮与土壤微生物等随水分梯度的降低而逐渐减少[15]。在漓江河岸带垂直水流方向,随着水淹频率的降低,土壤pH值、有效磷、速效钾等呈先增后减趋势[16]。这些研究揭示出不同区域土壤参数沿水分梯度响应的差异性。

鄂尔多斯遗鸥国家级自然保护区是我国的重要国际湿地之一[17],近年来,受气候变化和人类活动影响,干旱半干旱地区的湿地面积萎缩,影响周边的植物与土壤[9,18]。保护区在2000年之后因干旱导致水域面积萎缩。2015年通过引入矿井水与实施引黄补水工程,水域面积逐渐扩大,湿地环境逐渐恢复,生物多样性逐步提高。因此,本研究以鄂尔多斯遗鸥

保护区中的核心区为对象，以实地调查数据为基础，聚焦保护区湖泊影响下的土壤水分梯度变化，分析保护区内距湖岸不同距离处植物群落及土壤理化性质空间分布特征，揭示其空间变化趋势，为湿地植物多样性保护提供参考依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

鄂尔多斯遗鸥自然保护区湿地位于中国内蒙古自治区鄂尔多斯市中部（图 1a），鄂尔多斯东胜区市区以西约 45 km 处，经度 109°14′15″—109°23′6″E，纬度 39°42′49″—39°51′12″N，地处鄂尔多斯高原的中部，保护区位于典型草原向荒漠化草原过渡地带。保护区湿地处在一个天然的闭流盆地内，闭流盆地地势四周高，中央低，面积约 10 km^2。保护区属温带大陆性气候。主要受西北环流与极地冷空气影响，气候特征是春季干旱，夏季温热，秋季干爽，冬季寒冷，季节更替明显，冬长夏短，四季分明。保护区内光照资源丰富，年日照时数 3 200 h，年平均气温 5.2 ℃，无霜期年平均 116 d。保护区降雨多集中在每年的 7—8 月份，平均降水量约为 345 mm，蒸发量约为 2 524 mm。保护区的相对湿度较低，年平均湿度为 25%。年平均风速 4 m/s。鄂尔多斯市于 2017 年开工建设补水工程，2018 年实现通水，初期日补水量 4 000 m^3，后增至 20 000 m^3。

遗鸥自然保护区土壤类型以栗钙土、潮土、风沙土为主。草原植被群落草种主要以长芒草（*Stipa bungeana*）、糙隐子草（*Cleistogenes squarrosa*）、百里香（*Thymus mongolicus*）、冷蒿（*Artemisia frigida*）为主；沙地上以油蒿（*Artemisia ordosica*）、中间锦鸡儿（*Caragana intermedia*）为建群种；流沙上以沙米（*Agriophyllum squarrosum*）、沙竹（*Phyllostachys propinqua*）、油蒿（*Artemisia ordosica*）等为先锋群落；以芨芨草（*Achnatherum splendens*）、碱蓬（*Suaeda glauca*）、红柳（*Tamarix ramosissima*）等为建群种的盐化滩地等。人工植被主要分布在保护区的北部，有人工林 900 hm^2，成林方式以片状或带状为主，造林树种有杂交杨（*Populus × euramericana*）、旱柳（*Salix matsudana*）和柠条（*Caragana korshinskii*）等。

1.2 样地设计与调查

保护区湖泊位于核心区，形状不规则。为探究其周边植物群落的分布规律，在湖泊的南北两侧，分别沿垂直湖岸方向各布设 3 条平行样带（图 1b），在样带上进行调查植物群落调查和土壤取样。每条样带的信息如表 1 所示。从湖岸边缘开始，沿每条样带每间隔 50 m 设置样方。样方面积依据群落结构确定：草本群落为 1 m×1 m 样方，灌木群落为 5 m×5 m 样方，乔木群落为 10 m×10 m 样方。样方调查以某一群落类型首次出现的位置为起点，并沿样带对该类型群落进行连续取样（图 1c）。在实际采样中，南岸样带在超过 200 m 后，优势群落趋于单一（以油蒿为主）；北岸样带因受村庄与人为活动干扰，在 200 m 处终止。本次调查共完成 40 个样方，包括 21 个草本样方，17 个灌木样方和 2 个乔木样方。记录到芨芨草、莳萝蒿、草地风毛菊、长叶碱毛茛、芦苇、白刺、油蒿、盐爪爪及柽柳 9 种植物群落类型。在每个样方内，详细记录所有物种的名称与个体数量，并同步采集土壤样品，用于后续的群落多样性分析与土壤理化性质测定。

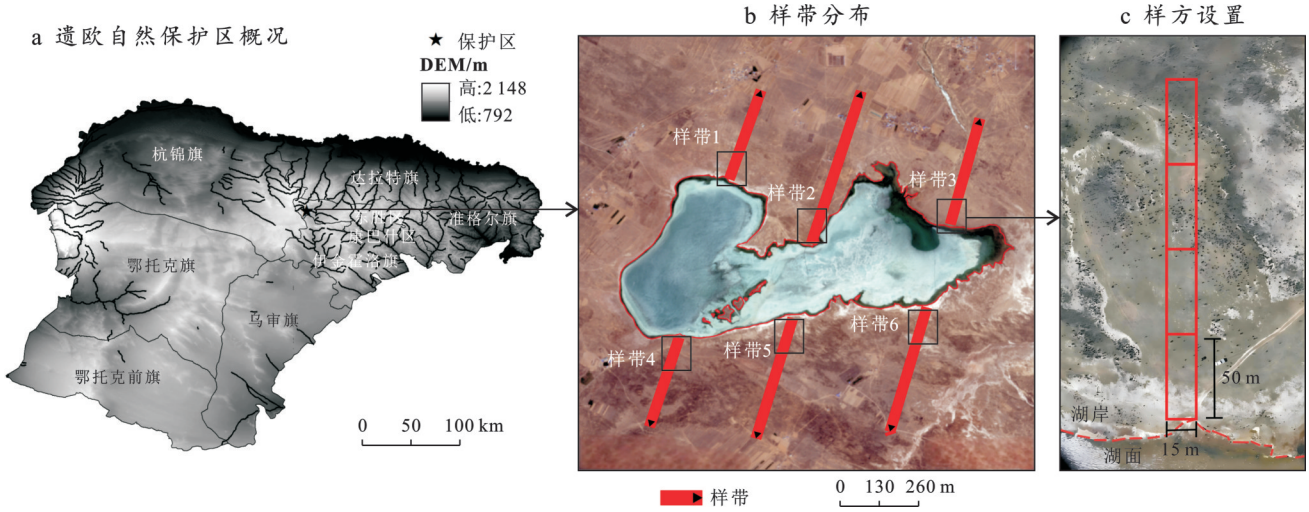


图 1 研究区概况与样带分布

Fig.1 Overview of study area and distribution of sampling transects

表 1　研究样地信息

Table 1　Information of study plots

样带序号	优势种	群落数/个	物种数/个
1	盐爪爪(*Kalidium foliatum*)、芨芨草	5	15
2	盐爪爪、油蒿	5	16
3	蒿萝蒿(*Artemisia anethoides*)、柽柳(*Tamarix chinensis*)	5	8
4	盐爪爪、油蒿	6	16
5	苦豆子(*Sophora alopecuroides*)、油蒿	5	18
6	蒿萝蒿、油蒿	5	16

1.3　土壤采集与处理

采集时去除土壤表层植被与枯落物,挖掘深 30 cm,长 40 cm,宽 30 cm 的土壤剖面,按照 0—10,10—20,20—30 cm 划分 3 层,并分别取样,当场使用铝盒和环刀测定重量,同时在每层取 200 g 土样装入密封袋带回实验室风干后,研磨过筛成 0.15 与 2 mm 进行土壤化学性质试验。

1.4　指标的测定方法

土壤容重(BD)采用环刀法;土壤含水率(SMC)采用烘干法;土壤孔隙度(STP)采用环刀法;电导率(EC)和 pH 使用导电仪和 pH 仪(水土比 5∶1 法);有机质(SOM)采用重铬酸钾外加热法;速效钾(AK)经 NH_4OAc 浸提,采用火焰光度法;速效磷(AP)经 0.5 mol/L $NaHCO_3$ 浸提,钼锑抗比色法测定;全磷经 NaOH 熔融,钼锑抗比色法测定;全钾经 NaOH 熔融,火焰光度法测定[19]。土壤粒径使用激光粒度分析仪进行分析,根据美国制土壤粒径分级标准将土壤质地分为黏粒<0.002 mm,粉粒 0.002～0.05 mm,砂粒 0.05～2 mm。

Simpson(D)优势度指数:

$$D=1-\sum p_i^2 \tag{1}$$

Shannon-Wiener(H)多样性指数:

$$H=-\sum_{i=1}^{S}(N_i/N)\lg(N_i/N) \tag{2}$$

Pielou(E)均匀度指数:

$$E=H/H_{\max} \tag{3}$$

Margalef(F)丰富度指数:

$$F=\frac{S-1}{\ln N} \tag{4}$$

式中:$p_i=N_i/N$ 为种 i 的个数占群落中总个数的比例;N 为物种的个体总数;H 为 Shannon-Wiener 多样性指数;$H_{\max}$ 为最大的 Shannon-Wiener 多样性指数($H_{\max}=\ln S$);S 为群落中物种的数量。

1.5　数据处理

本文使用 Origin 2021 绘制土壤理化性质随距湖岸距离变化图以及土壤理化性质与多样性指数皮尔逊相关性分析图,土壤理化性质沿湖岸距离梯度的空间分布与不同植物群落的土壤理化性质沿湖岸距离增加变化使用 IBM SPSS Statistics 25 单因素 ANOVA 分析。

2　结果与分析

2.1　植物群落组成与多样性沿湖岸距离梯度的变化

由表 2 可知,调查共记录植物 28 种。物种数随远离湖岸呈先增后减的趋势,在距离湖岸 50～100 m 达到峰值,为 21 种,在 150～200 m 时降至最低。各区域内植物组成存在 7 个共有种,包括牛筋草、蒿萝蒿、苦豆子、芨芨草、倒羽叶风毛菊、砂引草、冰草。典型物种的分布对湖岸距离梯度响应明显:盐生植物(盐爪爪)主要分布在距离湖岸 0～150 m 内,而油蒿在 0～200 m 均有分布,其多度随远离湖岸逐渐增多。从群落结构来看,保护区多以草本群落分布为主,灌木群落次之,乔木群落较少且以柽柳为优势种。各项多样性指数均响应了湖岸距离梯度变化,Simpson, Shannon-Wiener, Margalef 指数在距离湖岸 0～50 m 时最小,Pielou 指数在 0～50 m 与 150～200 m 时最低且数值相等,所有多样性指数在距离湖岸 100～150 m 达到最高值,在距离湖岸 100～150 m 的区域,多样性指数分别比 0～50 m 的高 0.17,0.43,0.05 和 0.40,Pielou 指数差异最小。整体上,所有多样性指数随远离湖岸变化呈现先增后减的趋势,Shannon-Wiener 指数随距湖岸距离增加波动较大。

2.2　土壤理化性质沿湖岸距离梯度的空间分布

土壤粒径沿湖岸距离梯度的空间分布特征如图 2 所示。由图 2 可知,研究区的土壤组成以砂粒为主,黏粒的比例最低。沿湖岸距离梯度的变化驱动各土层土壤粒径组成的空间分异。黏粒含量对湖岸距离梯度响应敏感,但不同土层变化模式各异。表层(0—10 cm)呈增加-减小-增加的波动趋势;10—20 cm 与 20—30 cm 则表现为先增后减的趋势,黏粒含量在距湖岸 50～100 m 出现峰值,而在 0～50 m 为最低。与 0～50 m 相比,50～100 m 处各土层的黏粒含

量分别增加了1.23%,1.88%和1.89%。粉粒含量:沿湖岸距离梯度的变化趋势与黏粒相似,在距湖岸50～100 m处粉粒含量最高,0—10 cm的粉粒含量在100～150 m处最低,10—20 cm与20—30 cm在距湖岸150～200 m处最低,不同土层深度的粉粒含量差异幅度分别为13.23%,17.24%,16.53%。砂粒含量:其变化趋势与黏粒和粉粒相反,最低值在距湖岸50—100 m出现,表层0—10 cm在100～150 m处最高,10—20 cm与20—30 cm在150～200 m处最高,不同土层深度差异幅度分别为14.35%,19.01%,17.51%。

表2 鄂尔多斯遗鸥自然保护区距湖岸不同距离处的植物多样性指数变化

Table 2 Changes in plant diversity indices at different distances from lakeshore in Ordos *Larus relictus* Nature Reserve

距湖岸垂直距离/m	主要群落类型	植物组成	物种数	Simpson指数	Shannon-Wiener指数	Pielou指数	Margalef指数
0～50	盐爪爪、芨芨草、芦苇、苦豆子、白刺、蒺藜、油蒿、长叶碱毛茛	盐爪爪、芦苇、芨芨草、冰草、牛筋草、海乳草、苦豆子、油蒿、柠条锦鸡儿、蒺藜、油蒿、长叶碱毛茛、牛心朴子、碱茅、蒲公英、乳苣、倒羽叶风毛菊、西伯利亚蓼、砂引草、尖头叶藜、白刺	20	0.52±0.18	0.98±0.36	0.34±0.09	0.71±0.29
50～100	白刺、蒺藜、芨芨草、油蒿	蒺藜、砂引草、白刺、牛筋草、芨芨草、盐爪爪、冰草、芦苇、海乳草、碱蓬、独行菜、苦豆子、长叶碱毛茛、蒺藜、草地风毛菊、雾冰藜、膜荚黄耆、尖头叶藜、油蒿、倒羽叶风毛菊、披针叶野决明	21	0.58±0.22	1.12±0.44	0.35±0.13	0.79±0.5
100～150	芨芨草、草地风毛菊、苦豆子、油蒿	冰草、芨芨草、砂引草、盐爪爪、苦豆子、蒺藜、蒺藜、草地风毛菊、碱蓬、雾冰藜、海乳草、倒羽叶风毛菊、独行菜、碱茅、乳苣、尖头叶藜、牛筋草、油蒿、白草	18	0.69±0.15	1.41±0.42	0.39±0.05	1.11±0.41
150～200	油蒿、苦豆子、柽柳	油蒿、牛筋草、蒺藜、冰草、柽柳、芨芨草、柠条锦鸡儿、砂引草、倒羽叶风毛菊、苦豆子、蒺藜、膜荚黄耆、草地风毛菊	13	0.61±0.22	1.21±0.47	0.34±0.09	0.94±0.45

注:①表中数据为平均值±标准差;下同。②各植物拉丁文学名分别为,冰草(*Agropyron cristatum*)、牛筋草(*Eleusine indica*)、海乳草(*Glaux maritima*)、牛心朴子(*Cynanchum hancockianum*)、碱茅(*Puccinellia distans*)、蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)、乳苣(*Mulgedium tataricum*)、倒羽叶风毛菊(*Saussurea runcinata*)、西伯利亚蓼(*Polygonum sibiricum*)、砂引草(*Messerschmidia sibirica*)、尖头叶藜(*Chenopodium acuminatum*)、白刺(*Nitraria sibirica*)、碱蓬(*Suaeda glauca*)、独行菜(*Lepidium apetalum*)、蒺藜(*Tribulus terrestris*)、草地风毛菊(*Saussurea amara*)、雾冰藜(*Bassia dasyphylla*)、膜荚黄耆(*Astragalus membranaceus*)、披针叶野决明(*Thermopsis lanceolata*)、白草(*Pennisetum centrasiaticum*)。

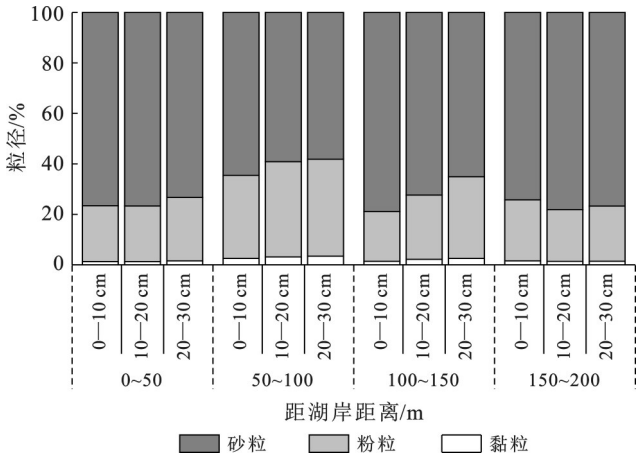
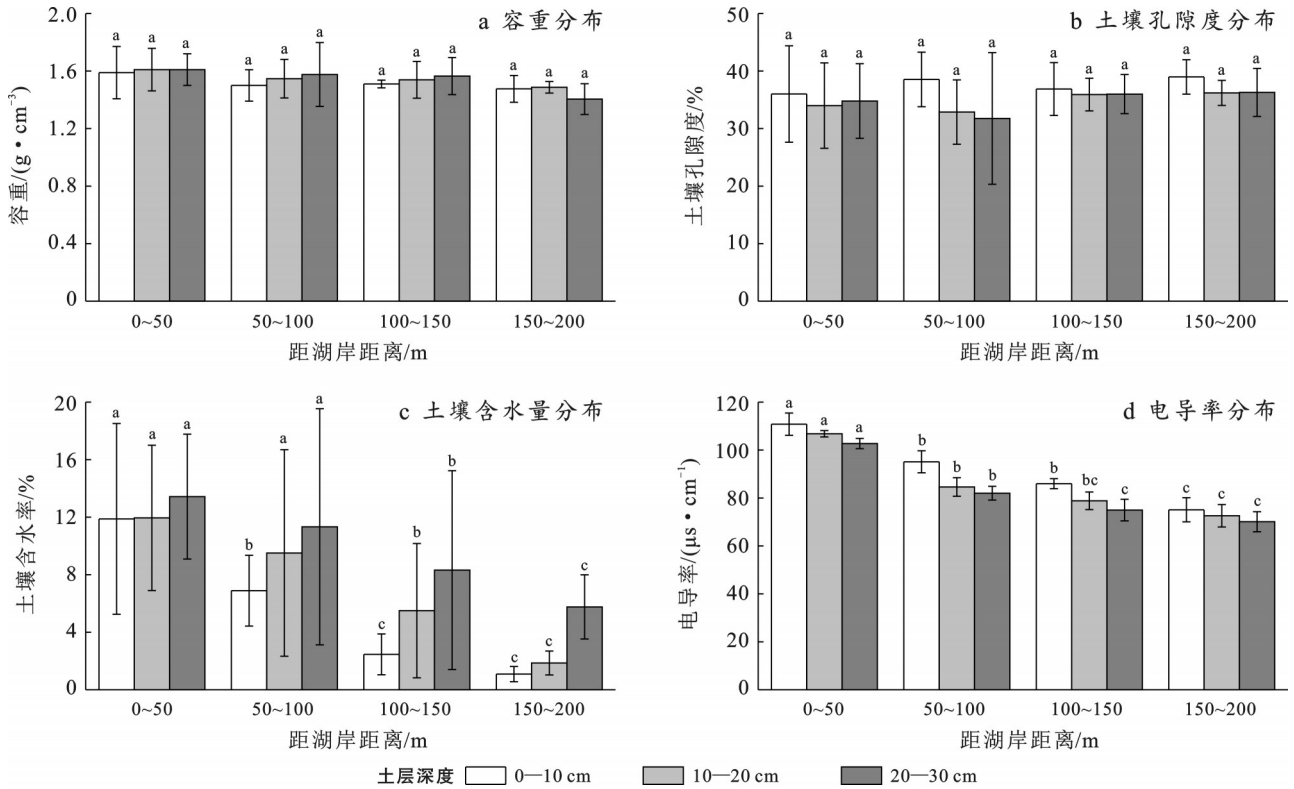


图2 鄂尔多斯遗鸥自然保护区土壤粒径的空间分布特征

Fig.2 Spatial distribution characteristics of soil particle size in Ordos *Larus relictus* Nature Reserve

土壤物理性质沿湖岸距离梯度的空间分布特征如图3所示。由图3可知,容重随距湖岸距离增加呈递减趋势,不同土层深度整体分别下降0.113,0.123和0.205 g/cm^3,但不同区域的差异未达到显著水平。孔隙度随着距湖岸距离增加时,0—10 cm呈现增加-减小-增加的趋势,10—20 cm与20—30 cm呈现减小-增加的趋势,但就整体而言,不同土层孔隙度分别净增2.97%,2.21%和1.49%,不同区域的差异不显著。含水率、电导率随着距湖岸距离增加时,不同土层深度呈现逐渐减小的规律。在水平方向上,在距离湖岸0～50 m区域的两项指标均显著高于150～200 m区域。具体表现为不同土层深度含水率分别高出10.79%,10.09%,7.67%;电导率则分别高出35.73,34.20和32.63 μS/cm。在垂直分布上,含水率随着土层深度增加逐渐递增,电导率呈现逐渐减小的趋势。对土壤容重、孔隙度、含水率及电导率的分析结果表明,研究区土壤物理性质沿湖岸距离梯度呈现规律性变化,含水率与电导率在水平与垂直方向上的分异明显,揭示了湖岸距离梯度对土壤物理性质的深刻影响。

土壤化学性质沿湖岸距离梯度的空间分布特征如图4所示。分析结果表明,湖岸距离梯度是驱动土壤化学性质空间分异的核心因子。随着距湖岸距离增加,各土层的pH值、有机质、速效磷、速效钾、全磷及全钾含量均呈递减趋势,揭示了湖岸距离对土壤养分的控制作用。其中,不同土层深度的pH整体分别减小了0.31,0.20和0.07,不同区域未达到显著性。土壤表层变化较大,土壤碱性随着湖岸距离增加逐渐变弱,可能与远水区域盐基离子随水分蒸发在表土聚集的强度减弱有关。在距离湖岸0—50 m的区域内,表层土壤(0—10 cm)有机质含量显著高于150—200 m区域,二者相差1.46 g/kg。随着距湖岸距离增加,表层有机质在100 m以外出现显著下降,而10—20 cm与20—30 cm土层的有机质含量在不同区域未呈现显著差异。速效磷含量在0～50 m处最高,显著高于100～200 m范围。与0～50 m区域相比,100～150 m处各土层速效磷分别显著降低0.83,0.53和0.46 mg/kg;150～200 m处则分别显著降低1.01,0.65和0.49 mg/kg。从空间变化来看,深层速效磷(20—30 cm)在距湖岸50 m以外即显著下降,而表层与中层(0—10 cm与10—20 cm)则在100 m以外才开始显著降低。速效钾含量同样在0～50 m处最高,显著高于150～200 m区域,不同土层深度分别下降15.63,7.46和6.15 mg/kg。在空间变化上,表层与深层土壤速效钾在100 m以外显著降低,而中层土壤则在150 m以外才出现显著下降。全磷在距湖岸0～50 m显著高于其他区域,自50 m外开始显著下降,在含量最低值区域(150～200 m)不同土层深度全磷含量分别与0～50 m相比分别减小0.17,0.15和0.15 g/kg。表层全钾含量在距湖岸0～50 m处最高,显著高于100～200 m区域;而中层与深层的全钾含量则在0～50 m处最高,显著高于其他区域。整体上,0～50 m区域内各土层的全钾含量比50～200 m区域显著高出0.04 g/kg。以上分析结果表明湖岸距离梯度影响土壤酸碱度、有机质与土壤养分由湖岸向外扩展逐渐减小。



注:不同小写字母表示相同土层深度在不同区域差异显著($p<0.05$)。下同。

图3　鄂尔多斯遗鸥自然保护区土壤物理性质的空间分布特征

Fig.3　Spatial distribution characteristics of soil physical properties in Ordos *Larus relictus* Nature Reserve

2.3　植物群落的土壤理化性质随着距湖岸距离增加的变化

芨芨草群落土壤理化性质随着距湖岸距离增加变化如表3所示。分析结果表明,湖岸距离对该群落土壤的理化性质均产生了系统性影响。土壤粒径沿湖岸距离的增加存在显著变化,黏粒表现为先减小后增加的趋势,整体减小3.47%;粉粒表现为逐渐递减的趋势,整体减小37.43%,黏粒和粉粒在距湖岸20 m

处均显著高于其他区域。砂粒随湖岸距离增加变化趋势与粉粒相反，整体增加41.1%，在距湖岸20 m时显著低于其他区域。容重、孔隙度、电导率随距湖岸距离增加呈下降趋势，差异不显著，整体上分别减小了0.015 g/cm^3，15.97%，14.27 μS/cm。而含水率随着距湖岸距离增加逐渐递减，不同区域差异显著，整体上减小15.64%。pH值、有机质随距湖岸距离增加逐渐显著降低，整体分别减小1.45和1.74 g/kg，随着距湖岸距离增加土壤碱性变弱，有机质呈下降趋势。速效磷、速效钾随着距湖岸距离增加逐渐减小，差异不显著，整体上分别减小了1.02和3.69 mg/kg。全磷、全钾随着距湖岸距离增加显著下降，分别减小为0.61，0.14 g/kg。沿湖岸距离增加驱动了芨芨草群落土壤环境由相对湿润、肥沃向干旱、贫瘠的演变。土壤表现为质地粗化、水分匮乏、盐分降低、有机质及养分减少的综合特征。

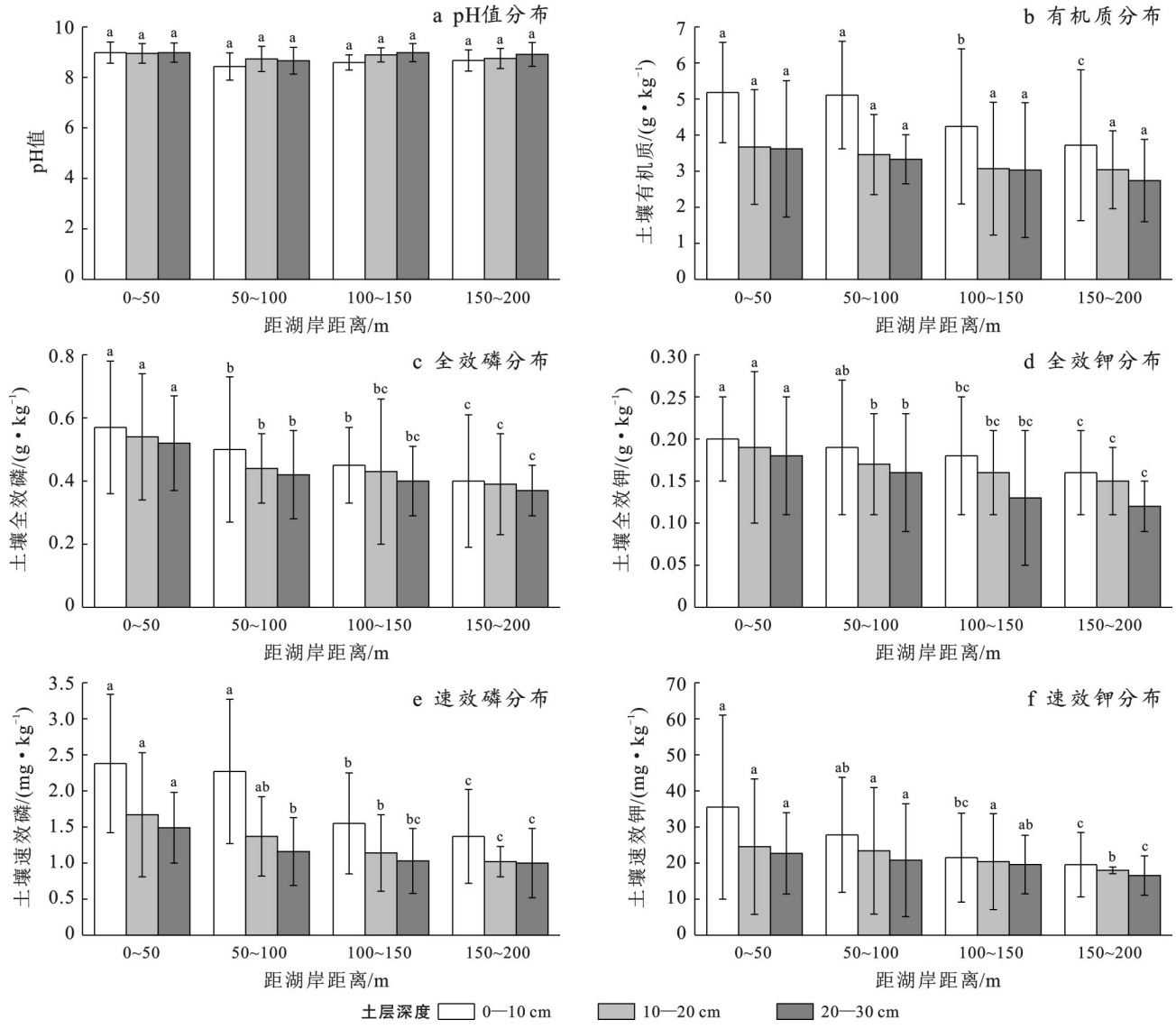


图4 鄂尔多斯遗鸥自然保护区土壤化学性质的空间分布特征

Fig.4 Spatial distribution characteristics of soil chemical properties in Ordos *Larus relictus* Nature Reserve

油蒿群落土壤理化性质沿湖岸距离增加变化如表4所示。分析结果表明，湖岸距离对该群落下的土壤物理性质影响更为显著，而对土壤化学性质的影响相对较小。土壤粒径组成整体变化小，差异未达到显著水平。黏粒含量随着距湖岸距离增加逐渐递减，整体减小了0.2%；粉粒含量为先增加后减小的趋势，总体为递增趋势，增加了0.7%；而砂粒变化与粉粒相反，整体减小了0.46%。容重、孔隙度、含水率、电导率随着距湖岸距离增加逐渐减小。其中，容重和含水率差异不显著，整体分别减小了0.197 g/cm^3，0.32%；孔隙度与电导率均在距湖岸180 m时显著减小，分别减小了5.71%，39.85 μS/cm。pH值随距湖岸距离增加逐渐递增，增加了0.01，变化小且差异不显著。土壤养分随湖岸距离增加差异不显著。其中，

有机质、速效钾随距湖岸距离增加逐渐递减,分别减少了 0.48 g/kg,8.67 mg/kg;而速效磷、全磷、全钾随距湖岸距离增加逐渐递增,分别增加了 0.42 mg/kg,0.27 g/kg,0.13 g/kg。相较芨芨草群落,油蒿群落土壤理化性质对湖岸距离的响应相对较弱,尤其在化学性质方面未形成一致的变化趋势。这可能与油蒿具有较强生态适应性有关,使其群落内土壤环境维持相对稳定。

表 3　芨芨草群落土壤理化性质沿湖岸距离增加的变化

Table 3　Changes in soil physicochemical properties of *Achnatherum splendens* community with increasing distance from lakeshore

土壤理化性质	距湖岸垂直距离/m		
	20	70	150
黏粒/%	5.10±1.97^{a}	1.30±0.6^{b}	1.63±0.32^{b}
粉粒/%	62.70±10.89^{a}	32.93±10.51^{b}	25.27±9.1^{b}
砂粒/%	32.00±12.43^{b}	65.77±11.11^{a}	73.1±9.39^{a}
容重/(g·cm^{-3})	1.603±0.03^{a}	1.592±0.04^{a}	1.588±0.06^{a}
孔隙度/%	39.78±2.45^{a}	32.10±13.10^{a}	23.81±3.12^{a}
含水率/%	20.02±2.82^{a}	12.29±5.62^{b}	4.38±1.24^{c}
电导率/(μS·cm^{-1})	94.09±15.76^{a}	80.38±4.89^{a}	79.82±10.07^{a}
pH值	9.46±0.07^{a}	8.79±0.04^{b}	8.01±0.17^{c}
有机质/(g·kg^{-1})	5.42±0.34^{a}	4.61±1.21^{ab}	3.68±0.65^{c}
速效磷/(mg·kg^{-1})	2.01±0.9^{a}	1.91±0.74^{a}	0.99±0.11^{a}
速效钾/(mg·kg^{-1})	27.68±6.11^{a}	24.67±12.91^{a}	23.99±14.99^{a}
全磷/(g·kg^{-1})	0.97±0.05^{a}	0.49±0.08^{b}	0.36±0.04^{c}
全钾/(g·kg^{-1})	0.26±0.03^{a}	0.13±0.04^{b}	0.12±0.04^{b}

注:不同小写字母表示差异显著(p<0.05)。下同。

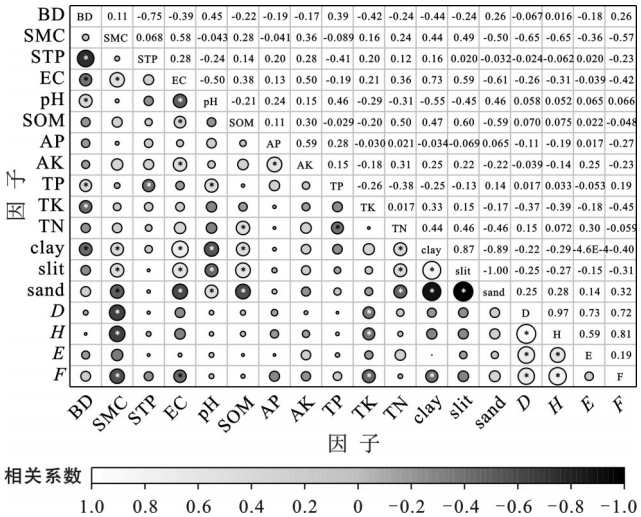
表 4　油蒿群落土壤理化性质沿湖岸距离增加的变化

Table 4　Change in soil physicochemical properties of *Artemisia ordosica* community with increasing distance from lakeshore

土壤理化性质	距湖岸垂直距离/m		
	50	110	180
黏粒/%	1.20±0.26^{a}	1.17±0.12^{a}	1.00±0.1^{a}
粉粒/%	14.33±6.83^{a}	17.43±4.16^{a}	15.03±0.49^{a}
砂粒/%	84.43±7.12^{a}	81.40±4.12^{a}	83.97±0.58^{a}
容重/(g·cm^{-3})	1.598±0.13^{a}	1.497±0.10^{a}	1.401±0.11^{a}
孔隙度/%	38.76±1.79^{a}	35.6±0.78^{ab}	33.05±3.72^{c}
含水率/%	1.11±0.46^{a}	0.87±0.28^{a}	0.79±0.11^{a}
电导率/(μS·cm^{-1})	75.92±4.76^{a}	69.97±4.83^{a}	36.07±23.93^{b}
pH值	8.43±0.17^{a}	8.43±0.1^{a}	8.44±0.08^{a}
有机质/(g·kg^{-1})	2.53±1.66^{a}	2.45±0.89^{a}	2.05±1.07^{a}
速效磷/(mg·kg^{-1})	0.97±0.59^{a}	1.19±0.95^{a}	1.39±1.06^{a}
速效钾/(mg·kg^{-1})	16.67±4.04^{a}	11.00±9.85^{a}	8.00±3.61^{a}
全磷/(g·kg^{-1})	0.66±0.02^{a}	0.66±0.15^{a}	0.93±0.44^{a}
全钾/(g·kg^{-1})	0.16±0.07^{a}	0.23±0.09^{a}	0.29±0.01^{a}

2.4　土壤理化性质与植物多样性的相关分析

保护区植物群落的土壤理化性质与植物多样性指数的相关性如图 5 所示。含水率与 Simpson,Shannon-Wiener 和 Margalef 指数显著相关(p<0.05),相关系数分别为−0.65,−0.65 和−0.57,含水率与 Simpson,Shannon-Wiener 指数相关性最强且相关系数相等。电导率与 Margalef 指数显著相关(p<0.05),相关系数为−0.42。全钾与 Simpson,Shannon-Wiener 和 Margalef 指数显著相关(p<0.05),相关系数分别为−0.37,−0.39 和−0.45,全钾与 Margalef 指数的相关性最强。黏粒与 Margalef 指数显著相关(p<0.05),相关系数为−0.4。



注:①BD 为容重(g/cm^{3});SMC 为土壤含水率(%);STP 为土壤孔隙度(%);EC 为电导率(μS/cm);SOM 为土壤有机质(g/kg);TP 为全磷(g/kg);TK 为全钾(g/kg);AP 为速效磷(mg/kg);AK 为速效钾(mg/kg);clay 为黏粒(%);silt 为粉粒(%);sand 为砂粒(%);D 为 Simpson 优势度指数;H 为 Shannon-Wiener 多样性指数;E 为 Pielou 均匀度指数;F 为 Margalef 丰富度指数。②*表示在 p<0.05 水平显著相关。下同。

图 5　鄂尔多斯遗鸥自然保护区土壤理化性质与植物多样性相关性

Fig.5　Correlation between soil physicochemical properties and plant diversity in Ordos *Larus relictus* Nature Reserve

土壤理化性质与植物多样性指数沿湖岸距离梯度的相关性如图 6 所示。分析表明,两者间的相关性强度与主导因子随距湖岸距离的增加而发生显著变化,呈现出明显的空间异质性。在距离湖岸 0～50 m 内,含水率与 Margalef 指数显著相关(p<0.05),相关系数为−0.59,有机质与 Simpson,Shannon-Wiener 指数显著相关(p<0.05),相关系数分别为 0.59 和 0.60,全钾与 Simpson,Shannon-Wiener 和 Margalef 指数显著相关(p<0.05),相关系数分别为

−0.69，−0.66，−0.58。在距离湖岸50～100 m内，电导率与Simpson，Shannon-Wiener指数显著相关（$p<0.05$），相关系数分别为−0.99，−0.97。pH值与Pielou指数显著相关（$p<0.05$），相关系数为0.96。黏粒、粉粒与Shannon-Wiener指数显著相关（$p<0.05$），相关系数均为−0.99，砂粒与Simpson和Shannon-Wiener指数显著相关（$p<0.05$），相关系数分别为0.95和0.99。在距离湖岸100～150 m内，容重与Margalef指数显著相关（$p<0.05$），相关系数为0.9，电导率与Pielou指数显著相关（$p<0.05$），相关系数为0.93，全钾与Simpson，Shannon-Wiener指数显著相关（$p<0.05$），相关系数分别为−0.98，−0.96。在距离湖岸150～200 m内，含水率、电导率、粉粒、砂粒与Pielou指数显著相关（$p<0.05$），含水率与Pielou指数相关性强，为−0.92，孔隙度与Margalef指数显著相关（$p<0.05$），相关系数为−0.88。

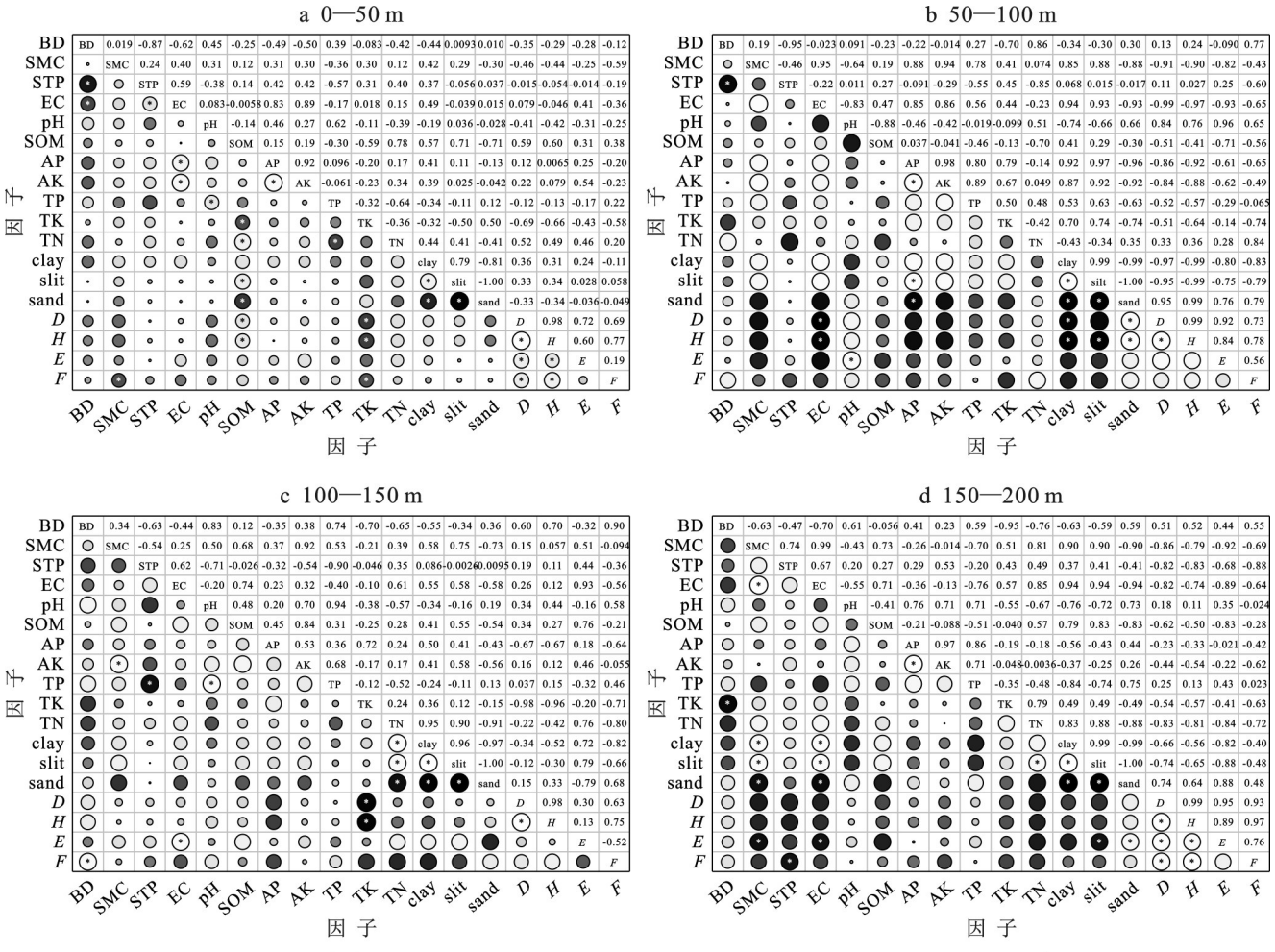


图6 鄂尔多斯遗鸥自然保护区距湖岸不同距离处的土壤理化性质与植物多样性相关性的空间分异

Fig.6 Spatial differentiation of correlations between soil physicochemical properties and plant diversity at different distances from lakeshore in Ordos *Larus relictus* Nature Reserve

3 讨 论

3.1 植物群落特征对土壤水分梯度的响应

通过湖岸距离梯度形成明显的土壤水分梯度，从而直接影响保护区内植物的分布格局，使其呈现出与土壤水分条件相对应的空间变化特征。从湖岸到远离湖泊的内陆，植物群落类型由盐生植物群落（如盐爪爪）过渡到沙生植物群落（如油蒿），中间过渡带分布有白刺、芨芨草、蒔萝蒿等过渡性群落。盐爪爪作为一种耐盐碱的植物，主要分布在距离湖岸150 m范围内，其数量随远离湖岸而递减。这一空间变化说明，由湖岸距离所表征的土壤水分有效性是驱动植物群落分布的核心因子。在距离湖岸0～100 m范围内，芨芨草、芦苇、白刺、草地风毛菊等耐盐植物随湖岸距离增加逐渐减少。油蒿作为沙生植物在全区广泛分布，分布的数量逐渐增多。其生长的土壤

环境为风沙土,油蒿根系发达,孔隙度较大。盐生植物向沙生植物的过渡,响应了从湖岸至内陆的土壤水分和电导率的变化,与冯湘[20]在研究四儿滩的植物变化结果一致。

各项植物多样性指数随远离湖岸变化呈先上升后下降的趋势。在水分条件适中的过渡区域,水盐胁迫减轻且资源尚可,为更多物种的共存提供了机会,导致多样性出现峰值;而在近湖岸的强盐渍化区域和远湖岸的严重干旱区域,仅有耐盐或耐旱植物能够存活,导致多样性下降。这一规律与宋兆斌等[21]对乌兰布和沙漠与西鄂尔多斯荒漠草原的研究结果相似。验证水分梯度影响植物多样性格局的驱动力。

不同植物群落通过其功能性状作用于土壤,强化沿土壤水分梯度的生境分异。盐爪爪通过密集的根系固结表层土壤,有效抑制了盐土的风蚀和水蚀,提升土壤孔隙度。充足的水分为凋落物分解和有机碳矿化等生态过程提供了良好的条件[22],使土壤的有机质和养分含量明显高于周边区域。芨芨草、芦苇等过渡群落发达的深根系有助于提升土壤孔隙度。而远水区的油蒿群落则适应于孔隙度大、保水性差的风沙土环境。使得芨芨草和油蒿群落随着距湖岸距离增加,土壤物理性质(容重、孔隙度、含水率、电导率)逐渐减小,土壤化学性质中只有有机质、速效钾变化一致,随着湖岸距离增加逐渐减小。芨芨草群落的粒径组成、含水率、pH值、有机质、全磷、全钾沿土壤水分梯度存在显著差异,油蒿群落的孔隙度、电导率沿土壤水分梯度存在显著差异。

3.2　土壤理化性质沿土壤水分梯度的空间异质性

土壤水分梯度是驱动研究区土壤理化性质空间分异的核心环境因子。本研究土壤含水率随着湖岸距离增加呈现逐渐减小的趋势,这一变化与武小钢等[12]对长治湿地公园研究结果一致,即近水区土壤含水率高于远水区。含水率的空间变化对植物分布具有直接影响,表现为从近水区域向远水区域过渡过程中,沙生植物的分布数量逐渐增加。随着距湖岸距离的增加,不同土层深度的土壤含水率与电导率均呈现显著递减趋势。这一变化主要与地形起伏相关:距湖岸越近,地势相对较低,有助于汇集水分并维持较高的土壤湿度;而随着距离增加,地势逐渐抬升,导致土壤含水率显著下降。与此同时,土壤盐分随水分的运移与蒸发在近湖岸区域相对聚集,而远离湖岸区域由于水分匮乏电导率也相应降低。含水率与电导率的协同变化,直接影响盐生与沙生植物的分布,进一步印证土壤水分过程对生态系统结构的关键调控作用。

随着距湖岸距离的增加,土壤水分减少,导致各土层的pH值、有机质及主要养分含量(速效磷、速效钾、全磷、全钾)均呈现一致的递减趋势,近湖岸区域得益于优越的水分条件促进了有机质的积累和养分的循环,维持了较高的土壤肥力;而随湖岸距离增加,水分胁迫加剧,植物生产力下降,凋落物输入减少,导致土壤养分保持能力下降。土壤养分随着湖岸距离增加逐渐减小,全效养分变化较小,而速效养分变化较大。这主要是因为速效养分作为植物可直接利用的形态,其有效性更易受土壤水分、微生物活性等环境因子的直接调控。这种土壤养分的空间异质性与植物组成及结构密切相关[23]。同时,不同类型的植物经过生长活动、凋落物分解等直接或间接影响土壤理化性质[24]。体现了植物与土壤之间的双向关系。

3.3　土壤环境与植物多样性的关联沿土壤水分梯度的空间异质性

植物-土壤是一个密切关联的整体,植物生长过程中占用大量的土壤资源,还通过根系分泌物、枯落物参与植物土壤的物质能量循环,直接或者间接影响土壤结构及养分[25]。而植物群落的结构和植物多样性的变化与土壤的性质有密切联系[26]。本研究证实,在土壤水分梯度上,植物多样性与土壤理化性质的关系呈现空间异质性,主导因子随土壤水分梯度发生更替。从整体上来看,植物多样性与含水率、电导率、全钾、黏粒呈负相关关系,其原因在于土壤含水率、电导率决定植物类型,全钾与黏粒影响植物群落组成,共同影响植物多样性。与罗琰[27]及胡广德等[28]分别在辉河湿地与金塔沙地的研究结论一致,共同印证了水盐条件是调控植物多样性的核心因子。

进一步分析不同区域的主导因子发现,驱动植物多样性的因子沿土壤水分梯度呈现明显的空间更替。在0～50 m,群落构建主要受含水率、有机质和全钾的共同调控;在50～150 m,主导因子转变为电导率;而在150～200 m,植物多样性则同时受到含水率与电导率的双重限制。这种现象与赵敏等[29]在不同盐分梯度下得出影响植物多样性的土壤因素存在差异的结果相似。除土壤条件外,气候变化、人为干扰也会显著影响植物多样性[30]。保护区近几年面临水域面积萎缩的生态问题,当地实施的生态补水措施正是通过调节土壤水分这一关键因素,间接影响植物群落结构与多样性特征[31]。本研究仅聚焦植物地上群落特征,未将地下部分纳入分析。未来研究

可结合地下部分分析，揭示土壤理化性质与植物多样性的关系。

4 结 论

（1）土壤水分梯度是调控植物分布与土壤性质空间分异的核心因子。随距湖岸距离的增加，植物群落类型由盐生植物向沙生植物过渡。植物多样性指数随湖岸距离增加呈单峰变化，在距离湖岸100～150 m处最大，反映中等土壤水分对植物的促进作用。

（2）土壤理化性质对土壤水分梯度表现显著的响应规律与空间异质性。随远离湖岸，含水率、电导率各土层平均降幅9.52%，34.19 μS/cm。同时，土壤养分含量亦呈递减趋势，近湖岸区域因水分充足，有机质积累与养分循环较强，土壤肥力显著高于远岸区域。

（3）植物多样性与土壤理化性质的关系具有明显的梯度特征。相关分析结果表明：整体上，多样性指数与含水率、电导率、全钾、黏粒显著相关。沿土壤水分梯度不同区域的植物多样性的驱动因子发生变化，在0～50 m处由含水率、有机质、全钾起主导作用，在50～150 m处主要由电导率驱动，在150～200 m处为电导率与含水率驱动。

参考文献(References)

[1] 李阳，罗健夫，侯志勇，等.莽山浪畔湖国家重要湿地植物多样性及环境解释[J].生态学报，2024，44(12)：5340-5350.
Li Yang, Luo Jianfu, Hou Zhiyong, et al. Plant diversity and environmental interpretation of Mang Shan Lang Pan Lake national important wetland [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(12):5340-5350.

[2] 拉多，巴桑，平措朗杰，等.阿热湿地植物群落结构特征和植物物种多样性研究[J].西藏大学学报，2014，29(5)：1-9.
La Duo, Ba Sang, Pingcuo Langjie, et al. Plant species diversity and main plant community structure of Ahre wetland in Damshong County, Tibet [J]. Journal of Tibet University, 2014,29(5):1-9.

[3] 王丽，张镱锂，王兆锋，等.放牧及水文扰动对拉萨地区湿草甸湿地土壤特征的影响[J].水土保持研究，2013，20(1)：66-69.
Wang Li, Zhang Yili, Wang Zhaofeng, et al. Effects of grazing and hydrological disturbance on soil properties of wet meadow wetland in Lhasa [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013,20(1):66-69.

[4] 王丹丹，王艳梅，王丹，等.江苏南京长江新济洲国家湿地公园的维管植物物种组成与群丛特征[J].湿地科学，2024，22(1)：106-119.
Wang Dandan, Wang Yanmei, Wang Dan, et al. Species composition and association characteristics of vascular plants in Jiangsu Nanjing Yangtze River Xinjizhou National Wetland Park [J]. Wetland Science, 2024, 22(1):106-119.

[5] 单元琪，姚允龙，张欣欣，等.三江平原七星河流域湿地植物多样性及影响因素[J].生态学报，2020，40(5)：1629-1636.
Shan Yuanqi, Yao Yunlong, Zhang Xinxin, et al. Study on wetland plant diversity and its influencing factors in the Qixing River basin of Sanjiang Plain [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(5):1629-1636.

[6] 郑文贤，李世雄，赵文，等.高寒草地土壤真菌群落结构对春季休牧的响应[J].生态学杂志，2024，43(6)：1703-1711.
Zheng Wenxian, Li Shixiong, Zhao Wen, et al. Responses of soil fungal community structure to spring grazing exclusion in alpine grassland [J]. Chinese Journal of Ecology, 2024,43(6):1703-1711.

[7] 崔盛超，图雅，萨拉，等.呼伦贝尔寸草苔草原群落特征及物种多样性与土壤理化性质的关系[J].水土保持通报，2023，43(5)：27-34.
Cui Shengchao, Tu Ya, Sa La, et al. Relationship between community characteristics and species diversity of *Carex duriuscula* and soil physiochemical properties in Hulunbuir steppe [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(5):27-34.

[8] 刘若莎，王冬梅，李平，等.青海高寒区典型人工林植物多样性、地上生物量特征及其相关性[J].生态学报，2020，40(2)：692-700.
Liu Ruosha, Wang Dongmei, Li Ping, et al. Plant diversity, ground biomass characteristics and their relationships of typical plantations in the alpine region of Qinghai [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(2):692-700.

[9] 刘佳凯.黄河三角洲滨海湿地水文连通及其对植被结构的影响[D].北京：北京林业大学，2020.
Liu Jiakai. Hydrological connectivity and its influence on vegetation in the coastal wetland in the Yellow River delta [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.

[10] 岳琳艳，郑俊强，韩士杰，等.长白山温带森林不同演替阶段土壤化学性质及微生物群落结构的变化[J].生态学杂志，2015，34(9)：2590-2597.
Yue Linyan, Zheng Junqiang, Han Shijie, et al. Soil chemical properties and microbial community structure at different succession stages of temperate forest in Changbai Mountains [J]. Chinese Journal of Ecology, 2015,34(9):2590-2597.

[11] 冯雪琦，赵星辉，刘占欣，等.黄河孟津段河岸带土壤有

机碳分布特征及影响因素分析[J].河南农业大学学报,2024,58(4):635-643.
Feng Xueqi, Zhao Xinghui, Liu Zhanxin, et al. Distribution characteristics and influencing factors of soil organic carbon in the riparian zone of Mengjin section of the Yellow River [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2024,58(4):635-643.

[12] 武小钢,杨秀云,边俊,等.长治城市湿地公园滨岸区植物群落特征及其与土壤环境的关系[J].生态学报,2015,35(7):2048-2056.
Wu Xiaogang, Yang Xiuyun, Bian Jun, et al. Species composition and soil gradient analysis of plant communities in the waterside zone of Changzhi National Urban Wetlands Park [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(7):2048-2056.

[13] 姜田亮,张恒嘉,纪永福,等.荒漠河岸带植被盖度的空间变化与土壤因子关系的探究[J].甘肃农业大学学报,2019,54(4):131-141.
Jiang Tianliang, Zhang Hengjia, Ji Yongfu, et al. The relationship between spatial variation of vegetation cover and soil factors in desert riparian zone [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2019,54(4):131-141.

[14] 罗琰,苏德荣,吕世海,等.辉河湿地河岸带土壤养分与酶活性特征及相关性研究[J].土壤,2017,49(1):203-207.
Luo Yan, Su Derong, lv Shihai, et al. Characteristics and correlation analyses of soil nutrients and enzyme activities in the riparian zone of Hui River wetland [J]. Soils, 2017,49(1):203-207.

[15] 徐静静,刘隋赟昊,朱新萍,等.巴音布鲁克天鹅湖高寒湿地不同水分梯度土壤微生物及酶活性的差异[J].新疆农业大学学报,2017,40(5):337-344.
Xu Jingjing, Liu Suiyunhao, Zhu Xinping, et al. Soil microorganism and enzymatic activity differences at various water gradients in Swan Lake alpine wetland of Bayanbulak grassland [J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2017,40(5):337-344.

[16] 王静.漓江河岸带土壤微生物群落结构及理化性质的空间分布特征[D].北京:北京林业大学,2019.
Wang Jing. Spatial distribution of soil microbial community structure and soil physicochemical properties in Lijiang riparian zone [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.

[17] 梁犁丽,汪党献,王芳.鄂尔多斯遗鸥保护区生态系统服务价值评估[J].中国水利水电科学研究院学报,2010(2):138-145.
Liang Lili, Wang Dangxian, Wang Fang. Evaluation of the ecosystem services value of the wetland in Ordos Relict Gulls Nature Reserve [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2010(2):138-145.

[18] 陈莉,陈琳琳,董志远,等.黄河三角洲典型潮沟系统水文连通性对大型底栖动物群落结构的影响[J].生态学报,2023,43(22):9232-9246.
Chen Li, Chen Linlin, Dong Zhiyuan, et al. Influence of hydrological connectivity of typical tidal creek system on macrobenthos community structure in the Yellow River delta [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(22):9232-9246.

[19] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000:25-109.
Bao Shidan. Soil and Agricultural Chemistry Analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 25-109.

[20] 冯湘.干旱半干旱区湿地植物群落动态研究:以宁夏盐池县四儿滩为例[D].北京:北京林业大学,2021.
Feng Xiang. Studies on the dynamics of wetland plant community, Ningxia Yanchi County, semi-arid regions of China [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2021.

[21] 宋兆斌,罗凤敏,马媛,等.乌兰布和-西鄂尔多斯荒漠草原过渡带典型灌木群落及其多样性[J].水土保持通报,2022,42(5):65-72.
Song Zhaobin, Luo Fengmin, Ma Yuan, et al. Typical shrub communities and its diversity in Ulan Buh-western Ordos steppe desert ecotone [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(5):65-72.

[22] 涂龙杰,李鹏,王博,等.沮河(黄陵段)河岸带有机碳组分分布特征及其影响因素[J].水土保持研究,2025,32(4):26-32.
Tu Longjie, Li Peng, Wang Bo, et al. Distribution characteristics and influencing factors of organic carbon fractions in the riparian zone of Juhe River(Huangling section) [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025,32(4):26-32.

[23] 韩铭.黑龙江太平沟国家级自然保护区典型森林群落植物多样性及土壤养分特征[D].黑龙江 哈尔滨:东北林业大学,2023.
Han Ming. Plant diversity and soil nutrient characteristics of typical forest communities in Taipinggou National Nature Reserve, Heilongjiang Province [D]. Harbin, Heilongjiang: Northeast Forestry University, 2023.

[24] 林丽,代磊,林泽北,等.黔中城市森林群落植物多样性及其与土壤理化性质的关系[J].生态环境学报,2021,30(11):2130-2141.
Lin Li, Dai Lei, Lin Zebei, et al. Plant diversity and its relationship with soil physicochemical properties of urban forest communities in central Guizhou [J]. Ecol-

ogy and Environment Sciences, 2021, 30(11): 2130-2141.

[25] 高军,杨建英,史常青,等.密云水库上游油松人工水源涵养林林下植物多样性与土壤理化特性[J].应用生态学报,2022,33(9):2305-2313.
Gao Jun, Yang Jianying, Shi Changqing, et al. Understory plant diversity and soil physicochemical properties of Pinus tabuliformis artificial water conservation forests in the upper reaches of Miyun reservoir, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(9): 2305-2313.

[26] 富晓松.石羊河中下游河岸植被与土壤变化研究[D].甘肃 兰州:甘肃农业大学,2010.
Fu Xiaosong.Study on change of riparian vegetation and soil in middle and downstream of Shiyang River [D]. Lanzhou, Gansu: Gansu Agricultural University, 2010.

[27] 罗琰.辉河湿地河岸带植物组成和多样性与土壤特征的相互关系[D].北京:北京林业大学,2019.
Luo Yan. Correlation between vegetation compositions and diversities and soil properties in the riparian zone of Hui River wetland [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.

[28] 胡广德,周继强,达军山,等.金塔沙地不同人工林下草本植物多样性与土壤性质的关系[J].草地学报,2023,31(6):1834-1841.
Hu Guangde, Zhou Jiqiang, Da Junshan, et al. Relationship between understory plant diversity and soil properties of different forests in sandy land of Jinta [J]. Acta Agrestia Sinica, 2023,31(6):1834-1841.

[29] 赵敏,赵锐锋,张丽华,等.基于盐分梯度的黑河中游湿地植物多样性及其与土壤因子的关系[J].生态学报,2019,39(11):4116-4126.
Zhao Min, Zhao Ruifeng, Zhang Lihua, et al. Plant diversity and its relationship with soil factors in the middle reaches of the Heihe River based on the soil salinity gradient [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(11): 4116-4126.

[30] 邹雨函,唐希颖,崔丽娟,等.不同干扰强度下土壤理化性状对湿地植物多样性的影响[J].生态学杂志,2025,44(6):1945-1952.
Zou Yuhan, Tang Xiying, Cui Lijuan, et al. Effects of soil physicochemical properties on plant diversity in a wetland under different intensities of disturbance [J]. Chinese Journal of Ecology, 2025,44(6):1945-1952.

[31] 吴成丹,孟昭军,刘曼红,等.挠力河自然保护区退耕湿地植物多样性及其与土壤化学因子的关系[J].江西农业大学学报,2024,46(4):969-979.
Wu Chengdan, Meng Zhaojun, Liu Manhong, et al. Vegetation diversity and its relationship with soil chemical factors in reclaimed wetland in Naolihe Nature Reserve [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2024,46(4):969-979.

(上接第40页)

[24] 吴光艳,成婧,祝振华,等.黄土高原南部人工林林冠对降雨特征的影响分析[J].水土保持研究,2011,18(4):32-35,42.
Wu Guangyan, Cheng Jing, Zhu Zhenhua, et al. Rainfall characteristics under canopy of plantation forest in the southern Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011,18(4):32-35,42.

[25] 朱锐鹏,刘殿君,张世豪,等.黄土丘陵沟壑区不同土地利用类型水土流失效应[J].水土保持研究,2022,29(4):10-17.
Zhu Ruipeng, Liu Dianjun, Zhang Shihao, et al. Characteristics of runoff and sediment yield in different land use types in hilly and gully region of the Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(4):10-17.

[26] Zhang Jinping, Zhang Hang, Xiao Honglin, et al. Effects of rainfall and runoff-yield conditions on runoff [J]. Ain Shams Engineering Journal, 2021, 12(2): 2111-2116.

[27] Sikorska A E, Viviroli D, Seibert J. Effective precipitation duration for runoff peaks based on catchment modelling [J]. Journal of Hydrology, 2018,556:510-522.

[28] 李澳,于志静,王德富,等.黄土高原地区水土流失对土地利用和降水变化的响应[J].水土保持学报,2024,38(4):95-102.
Li Ao, Yu Zhijing, Wang Defu, et al. Response of soil and water loss to land use and precipitation changes on the Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(4):95-102.

[29] Chen Tao, Shu Jisen, Han Liu, et al. Modeling the effects of topography and slope gradient of an artificially formed slope on runoff, sediment yield, water and soil loss of sandy soil [J]. Catena, 2022,212:106060.

[30] Ran Qihua, Wang Feng, Gao Jihui. Modelling effects of rainfall patterns on runoff generation and soil erosion processes on slopes [J]. Water, 2019,11(11):2221.